

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL

ROBOTIC TABLE FOOTBAL

### SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Hlavinka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

BRNO 2018

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Radek Hlavinka

**ID:** 192178

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Robotický stolní fotbal

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Zpracujte rešerši týkající se robotického stolního fotbalu a algoritmy zpracování scény.
- 2) Seznamte se se softwarem Automation Studio V4 a vizualizace od společnosti B&R.
- 3) Seznamte se s realizovanými strategiemi hry.
- 4) Ověřte strategie hry na reálném modelu robotického stolního fotbalu.
- 5) Vyberte nejlepší strategii hry a navrhnete jejich modifikaci, která vykazuje nejvýhodnější vlastnosti.
- 6) Vyhodnoťte dosažené výsledky.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Firemní literatura B&R: Automation Studio V4

[2] Firemní literatura B&R: Produkty pro řízení pohybu a vizualizace společnosti B&R

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

**Konzultant:** Ing. Andrej Rajnoha, B&R Brno

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá Robotickým stolním fotbalem firmy B&R. Konkrétně nedostatky momentálního stavu strategie hry ovládání herních os a navrhuje jejich řešení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Robotický stolní fotbal, B&R, Strategie

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with Robotic table football constructed by B&R. Some shortcomings of current state of game strategy and axis controll are pointed out and corrections are suggests.

## **KEYWORDS**

Robotic table football, Robotic table foosball, B&R, Strategy,

HLAVINKA, Radek. *Robotický stolní fotbal*. Brno, 2020, 50 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Robotický stolní fotbal“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Petru Pivoňkovi CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci, odbornému konzultantu Ing. Andreji Rajnohovi a Ing. Marku Svozilovi za rady při řešení problémů se softwarem B&R. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Ondřeji Slámovi a Bc. Alexandru Koroťinskyimu za spolupráci při seznamování se s momentálním stavem řešení Robotického stolního fotbalu.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>1 Bernecker + Rainer In Industrial Automation</b>	<b>10</b>
1.1 Ethernet Powerlink . . . . .	11
1.2 Motion . . . . .	12
1.3 X20 System . . . . .	12
1.4 Automation Studio . . . . .	13
1.5 HMI . . . . .	14
1.5.1 VC3 - Visual Components 3 . . . . .	14
1.5.2 VC4 - Visual Components 4 . . . . .	14
1.5.3 mapp View . . . . .	15
<b>2 Stávající řešení robotického stolního fotbalu</b>	<b>16</b>
2.1 KiRo - Kicker Roboter . . . . .	16
2.2 The University of Akron . . . . .	18
2.3 Brigham Young University . . . . .	19
2.4 Eidhoven University of technology . . . . .	19
2.5 Pilz GmbH & Co. KG . . . . .	20
2.6 Ecole polytechnique fédérale de Lausanne . . . . .	20
2.7 České vysoké učení technické . . . . .	21
2.8 Shrnutí . . . . .	22
<b>3 Současný stav RSF firmy B&amp;R</b>	<b>23</b>
3.1 Konstrukce . . . . .	23
3.2 Pohony . . . . .	23
3.3 Bezpečnost . . . . .	25
3.4 Detekce míčku . . . . .	25
3.5 Strategie . . . . .	26
3.5.1 BaseStrategy . . . . .	26
3.5.2 Strategie B . . . . .	26
3.5.3 Strategie C . . . . .	26
<b>4 Rozbor nedostatků současného řešení RSF firmy B&amp;R</b>	<b>28</b>
4.1 Omezení strategie . . . . .	28
4.1.1 Střela pod úhlem . . . . .	29
4.1.2 Příhrávka do strany . . . . .	32
4.1.3 Zachycení míče . . . . .	33
4.1.4 Kopírování $y$ souřadnice míče . . . . .	34

4.1.5	Pyramidová formace . . . . .	34
4.2	Omezení výhledu kamer . . . . .	35
4.3	Řízení motorů . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Implementace řešení nedostatků a jejich zhodnocení</b>	<b>37</b>
5.1	Kopírování $y$ souřadnice míče . . . . .	37
5.2	Úprava modulu řízení motorů . . . . .	38
5.3	Střela pod úhlem . . . . .	38
5.4	Střela s přihrávkou . . . . .	39
5.5	Strategie D . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>42</b>
	<b>Literatura</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>47</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Naměřené průběhy odchylky při sledování <math>y</math> souřadnice míče</b>	<b>49</b>
<b>B</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>50</b>



# Seznam obrázků

1.1	Logo B&R Automation . . . . .	10
1.2	Komunikační cyklus EPL . . . . .	11
1.3	Schéma kaskádního regulátoru ACOPOS . . . . .	12
1.4	I/O systém X20 . . . . .	13
1.5	I/O systém X20 . . . . .	14
2.1	Kicker Roboter 1 . . . . .	16
2.2	Kicker Roboter 2 . . . . .	17
2.3	Detekce míčku Akron . . . . .	18
2.4	Řešení Brigham Young University . . . . .	19
2.5	Řešení firmy Pilz GmbH & Co. KG . . . . .	20
2.6	Snímání polohy protihráče EPFL . . . . .	21
2.7	Algoritmus přihrávky . . . . .	21
3.1	Pojízdný kabinet . . . . .	24
3.2	Uchycení motorů RSF B&R . . . . .	24
3.3	Detekce gólu . . . . .	25
3.4	Pyramidové rozestavění hráčů. . . . .	27
4.1	Schématický náskres hřiště . . . . .	28
4.2	Schématický náskres pro výpočet vzdálenosti $d$ . . . . .	29
4.3	Závislost potřebného odstupu na vzdálenosti míče od rohu brány . . . . .	30
4.4	Schématický náskres hřiště . . . . .	31
4.5	Závislost potřebného odstupu na vzdálenosti míče od rohu brány . . . . .	33
4.6	Natočení herních figurek pro zachycení míčku. . . . .	34
5.1	Schéma regulace poloh os v modulu strategie . . . . .	37
5.2	Rozdělení hřiště pro potřeby Strategie D . . . . .	40
A.1	Průběh odchylky při sledování $y$ souřadnice míče, bez zpětné vazby . . . . .	49
A.2	Průběh odchylky při sledování $y$ souřadnice míče, zavedená zpětná vazba . . . . .	49

# Úvod

Vývojem umělé inteligence, robotiky a automatizace obecně dochází k realizaci některých částečně obskurních projektů, které na první pohled nemají praktické využití. Do této kategorie můžeme zařadit i robotický stolní fotbal RSF. Tato hra, klasifikovaná jako profesionální sportovní disciplína, však nabízí prostor pro zmíněné obory možnost otestovat schopnosti techniky proti lidskému protihráči na celkem jednoduché platformě a představuje tak další krok při pokusech integrace robotů do běžného života. Studenti strojírenské a elektrotechnické fakulty VUT v Brně vytvořili takovýto RSF formou bakalářských a diplomových prací pod záštitou firmy B&R sídlící v Brně, která celý projekt podporuje. Hra je již zprovozněna a je využívána pro propagační účely firmy B&R.

Hlavním tématem této práce je zhodnocení možností, jak rozvinout strategii hry robotického stolního fotbalu a možné využití neuronových sítí a strojového učení pro zlepšení dynamických vlastností RSF. Ve zbylém času budou některé návrhy realizovány, ale to je náplní až navazující bakalářské práce. Body zadání 3 a 4 vyžadují seznámení se s kamerou a návrh algoritmu pro zpracování scény. Tato část RSF je však již hotová a funkčnost splňuje požadavky pro účely stolu, a proto se danými body nebude práce detailně zabývat, ale stručně čtenáře seznámí s nyní používaným řešením.

V rámci tohoto dokumentu bude nejprve představena firma B&R, následně budou analyzována některá další řešení RSF s důrazem na originalitu. Dále bude následovat seznámení s nynějším řešením RSF firmy B&R. V hlavní části práce budou zhodnoceny některé nedostatky nynějšího řešení RSF a návrh jejich odstranění, způsob rozšíření nynější strategie a možnosti použití neuronových sítí.

# 1 Bernecker + Rainer In Industrial Automation

Společnost B&R Automation založili v roce 1979 Erwin Bernecker a Josef Rainer za účelem vývoje a výroby průmyslové automatizační techniky, včetně PLC, servopohonů a motorů. Dnes B&R nabízí kromě svých produktů i služby aplikačních techniků.

**PERFECTION IN AUTOMATION**  
A MEMBER OF THE ABB GROUP



Obr. 1.1: Logo B&R Automation.[15]

Hlavní sídlo společnosti se nachází v Egglesbergu, Rakousko, kde se zároveň odehrává hlavní část výroby, vývoje a školení.

Na český trh firma vstoupila v roce 1997. Od té doby má na území Česka dvě pobočky - v Brně a Praze. Brněnská pobočka je jedna z mála, ve které se odehrává i část vývoje a jediná v Evropě s druhou úrovní technické podpory.

Průraz na trhu B&R zaznamenalo v roce 1980 uvedením velice pokrokového volně programovatelného PLC Unicontrol, následoval rok 1993, v němž firma vstoupila na trh průmyslových počítačů s modelem IPC2000 a poté rok 1997, kdy došlo k vydání první verze *Automation Studio* (AS), vývojového softwaru, nabízející nástroje pro jednoduchý vývoj aplikace od začátku až do konce. V průběhu let firma vyvinula další koncepty např.: servo pohony ACOPOS, soubor softwarových nástrojů *mapp Technology* a v roce 2016 ACOPOStrack, unikátní systém umožňující rychlou a efektivní výrobu stylu batch size 1 (každý výsledný výrobek je jiný).

Důležitý milník v historii firmy představuje rok 2017, kdy švýcarsko-švédská společnost ABB odkoupila B&R od zakladatelů, aby vyplnila mezery ve svém portfoliu. I přes integraci do ABB Group si však B&R zachovala velkou část nezávislosti a nyní již pracuje na integraci ostatních produktů ABB do svých řešení.

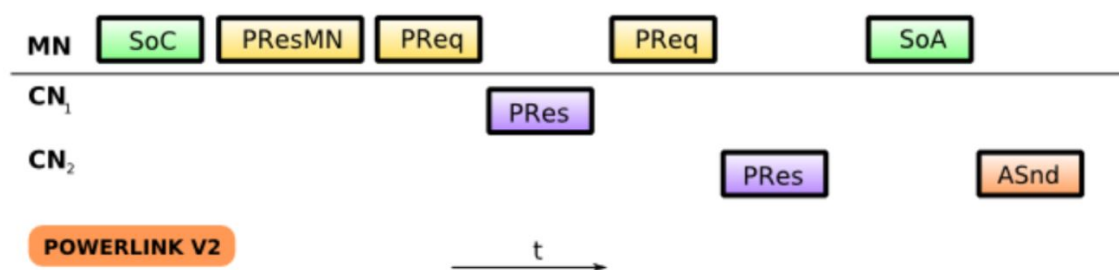
V následujících sekcích budou představeny některé technologie firmy, které sice nebyly součástí zadání, ale jsou použity na řešení stolního fotbalu.

## 1.1 Ethernet Powerlink

Základní komunikační protokol firmy B&R, nazývaný *Ethernet Powerlink* (EPL), byl vyvinut speciálně pro účely průmyslové automatizace, s úmyslem zjednodušení komunikace a vývoje, splňující požadavky na real-time komunikaci. Pro další vývoj byla v roce 2002 vytvořena samostatná skupina Ethernet Powerlink Standardization Group (EPSG) a EPL byl prohlášen za open-source. Od té doby byla vydána nová verze - EPL v2, která je rozšířena aplikační vrstvou CanOpen a splňuje normu IEC61508 definující OpenSafety.

V rámci EPL sítě, pracující na principu Master-Slave, je řídicí člen označen jako *Managing Node* (MN) a řízené členy *Controlled Node* (CN). Protokol je standardně postaven na jádře Fast Ethernet, zajišťující rychlost přenosu  $100 \text{ Mbs}^{-1}$ , kterou EPL doplňuje o minimální dobu komunikačního cyklu až  $200 \mu\text{s}$  a schopnost synchronizace až 240 CN na  $\pm 100 \text{ ns}$ . Průběh cyklu lze vidět na obr. 1.2 :

1. MN vyšle SoC - Start of Cycle pro synchronizaci všech CN
2. MN vyšle PReq - Pull Request pro vyčtení hodnot z daného CN
3. CN vyšle PRes - Pull Response spolu s požadovanými daty, které mohou číst všechna zařízení v síti
4. Kroky 2 a 3 jsou opakovány, dokud nejsou dotázány všechny CN
5. MN vyšle SoA - Start of Asynchronous. V této části může jeden CN, vybraný MN posílat asynchronní data do konce cyklu.



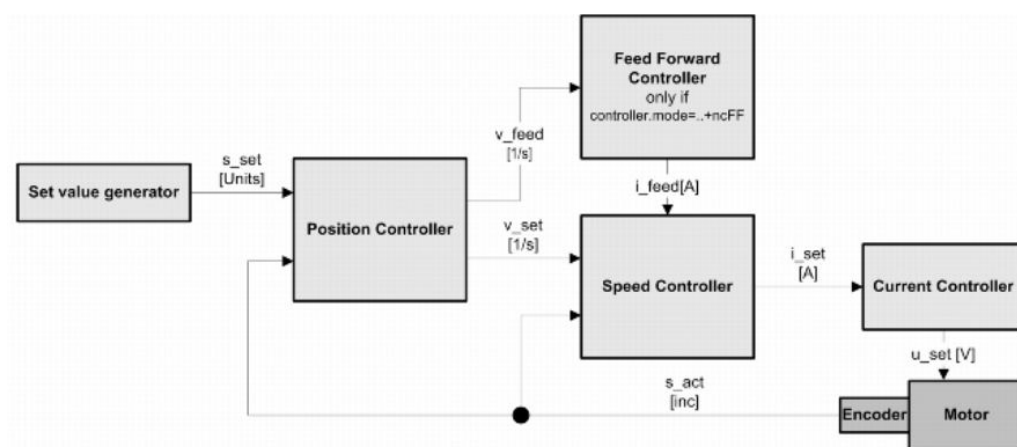
Obr. 1.2: Komunikační cyklus EPL.[13]

Dalšími výhodami EPL je nezávislost na HW, možnost realizace libovolné topologie, komunikace s nedeterministickými protokoly skrz brány a *Hot plugging*, schopnost pokračovat v komunikaci i při vyjmutí některého z CN. To je výhodné např. pro údržbu či výměnu některého z modulů.

EPL je zcela integrován v systémech B&R a pro jeho nastavení je potřeba minimum práce, což z něj činí ideální volbu při vývoji s produkty této firmy.

## 1.2 Motion

Pro řízení pohybu vyvinula firma B&R portfolio frekvenčních měničů a servopohonů ACOPOS stejnosměrných motorů a převodovek. ACOPOS komunikuje s PLC pomocí funkčních bloků definovaných v PLCopen protokolem EPL. Pro regulaci polohy nebo rychlosti je v ACOPOS realizován kaskádní regulátor zobrazený na obr. 1.3. Výstupem tohoto regulační smyčky je PWM signál jdoucí do motoru. Vstupní hodnotu regulátoru vypočítává s periodou  $400\mu\text{s}$  *setpoint generator* na základě předem zadaných parametrů (náběh zrychlení, maximální zrychlení a maximální rychlost). Tento ideální průběh následně regulátor srovnává s naměřenými hodnotami z enkodéru motoru. V případě překročení předem nastaveného parametru *lag error* servopohon ukončí pohyb a zabrzdí motor.



Obr. 1.3: Schéma kaskádního regulátoru ACOPOS.[24]

## 1.3 X20 System

B&R nabízí dva základní typy I/O systémů:

1. X20 systém: Karty X20 představují plně modulovatelný I/O systém vhodný pro využití v rozvaděči. Díky tří-dílnému designu všech karet (obr. 1.4) je i údržba velice jednoduchá a portfolio B&R nabízí komunikační moduly pro připojení přes většinu protokolů dnes užívaných v průmyslové automatizaci. Jednotlivé karty mezi sebou komunikují pomocí sériového X2X protokolu.
2. X67 systém: Navrženy pro umístění mimo rozvaděč, moduly splňují krytí IP67. Jako v případě systému X20 i zde je možné vytvořený ostrůvek připojit k libovolnému systému přes jeden ze standardizovaných komunikačních protokolů.



Obr. 1.4: I/O systém X20.[22]

## 1.4 Automation Studio

AS je vývojové prostředí od B&R uzpůsobené pro rychlý a efektivní vývoj aplikací s produkty této společnosti. S uživatelsky přívětivým prostředím AS nabízí plnou zprávu správu a konfiguraci HW nejen z vlastního portfolia. Do AS lze importovat HW jiných společností.

Zpráva a vývoj SW je také plně rozvinuta. AS podporuje vývoj všech jazyků normy IEC 61131-3, tedy Ladder diagram (LD), Strukturovaný text (ST), IL, FBD a SFC. Případně je možné plnohodnotně programovat v jazyce ANSI-C nebo C++. Tyto jazyky lze v rámci projektu libovolně kombinovat a veškerý SW je možné vyvinout a do jisté míry otestovat bez HW díky sofistikovanému systému simulace. Samozřejmostí je i velké množství knihoven spolu s již vyhotovenými příklady, nejčastěji v ST nebo ANSI-C.

Důležitou součástí AS je i množství diagnostických nástrojů, včetně *Loggeru*, který zaznamenává všechny poruchy a oznámení systému nebo *Trace*, což je nástroj pro zaznamenání časového průběhu libovolných proměnných.

Další ulehčení vývoje SW představují balíčky funkčních bloků *mapp Technology*, sloužící k zapouzdření několika funkcí nebo celých knihoven (např. blok *MpAxisBasic* sloužící pro ovládání jednoho motoru místo řídicího algoritmu ACN10). Její modulární bloky výrazně usnadňují vývoj softwaru a urychlují tak vývoj nových strojů průměrně o 67%. [18]



Obr. 1.5: I/O systém X20.[23]

## 1.5 HMI

B&R pro potřeby vizualizace nabízí tři nástroje:

### 1.5.1 VC3 - Visual Components 3

Vizualizační komponenty míněné pro textové displeje. Jedná se o zastaralý druh vizualizace a nebude tedy dále rozebírána.

### 1.5.2 VC4 - Visual Components 4

Jedná se o prostředí pro vývoj vizualizace integrovaný do AS. Výsledná vizualizace běží buď na obrazovce nebo na VNC serveru. Ačkoli byla VC4 donedávna hlavním vizualizačním prostředkem, představuje dnes již starou technologii a je od ní upouštěno.

### 1.5.3 mapp View

Nový způsob vizualizace využívající HTML5, CSS3 a JavaScript, které však není třeba znát, neboť AS obsahuje grafické prostředí, ve kterém je možné celou vizualizaci vyvinout pomocí Drag&Drop.

Stránky mají definované své rozložení nazývané "Layout", rozdělující je do více částí. Na stránku s definovaným layoutem je poté přidáván obsah, neboli "Content", v podobě "widgetů", individuální pro každou stránku. Příkladem widgetu je např. tlačítko, štítek nebo vložený PDF dokument. Nastavení vlastností widgetu je možné pomocí Properties okna v AS. Výsledný kód stránky se vytvoří na základě umístěných widgetů a jejich vlastností.

Vizualizace se vykonává přímo na sledovacím zařízení a vyžaduje prohlížeč, s vykreslovacím jádrem chromio. Fakt, že vizualizace nezatěžuje PLC představuje velkou výhodu, avšak je stále třeba s ním komunikovat. K tomu slouží OPC-UA server.



## 2 Stávající řešení robotického stolního fotbalu

V této sekci budou představeny některé již funkční řešení RSF se zvláštním zřetelem na strategii hry a využití dostupných dat pro ovládání robota.

Většina těchto stolů vznikla v rámci univerzitních projektů, jako je tento, a některé z nich byly později zdokonaleny a uvedeny na trh.

### 2.1 KiRo - Kicker Roboter

Projekt, původně vyvíjen na univerzitě v Freiburgu, patří mezi nejstarší úspěšně dokončené. První funkční verze byla prezentována v roce 2002 na konferenci Robocup. Prezentovaný stůl snímал polohu míčku a hráčů pomocí kamery z polohy nad hrací plochou, což bylo později opuštěno, kvůli citlivosti systému na osvětlení a komplikacím při zakrytí výhledu kamery (osa, herní figurky, neznámý objekt - např. při pokusech o podvádění) a ovládací mechanismus os byl navržen pro snadnou montáž na libovolný stůl. Licenci na tento koncept zakoupila firma Gauselmann AS a zdoko-

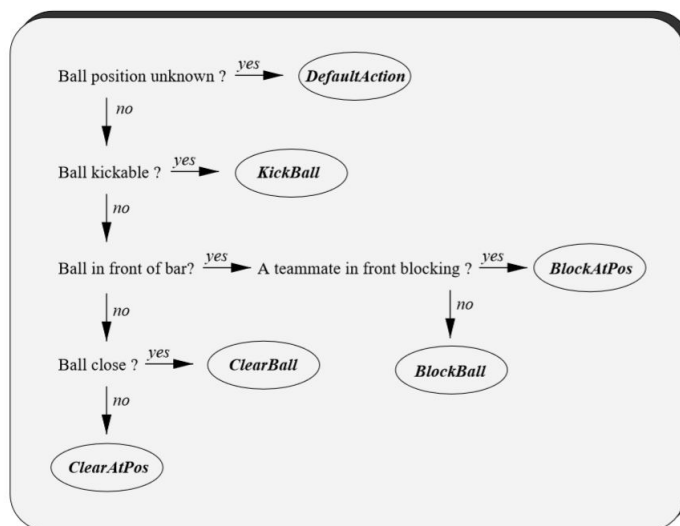


Obr. 2.1: Kicker Roboter po úpravě od firmy Gauselmann AS.[2]

nalila jej hlavně ve směru robustnosti. Místo upravení hotového stolu byla vyvinuta nová konstrukce s plně robotizovanou stranou stolu. Infračervené LED ozařují herní plochu, která je pro lidské oko neprůhledná, avšak propouští záření v IR části spektra

zachycované pomocí IR šedotónové kamery pod stolem a využito pro detekci polohy míče. Pro určení posunutí a natočení os využívá řešení pouze enkodérů motorů.

Data jsou využita pro aktualizaci dat modelu reálného světa pomocí kterého je dále řízena hra. Základní algoritmus řízení je na obrázku 2.2.



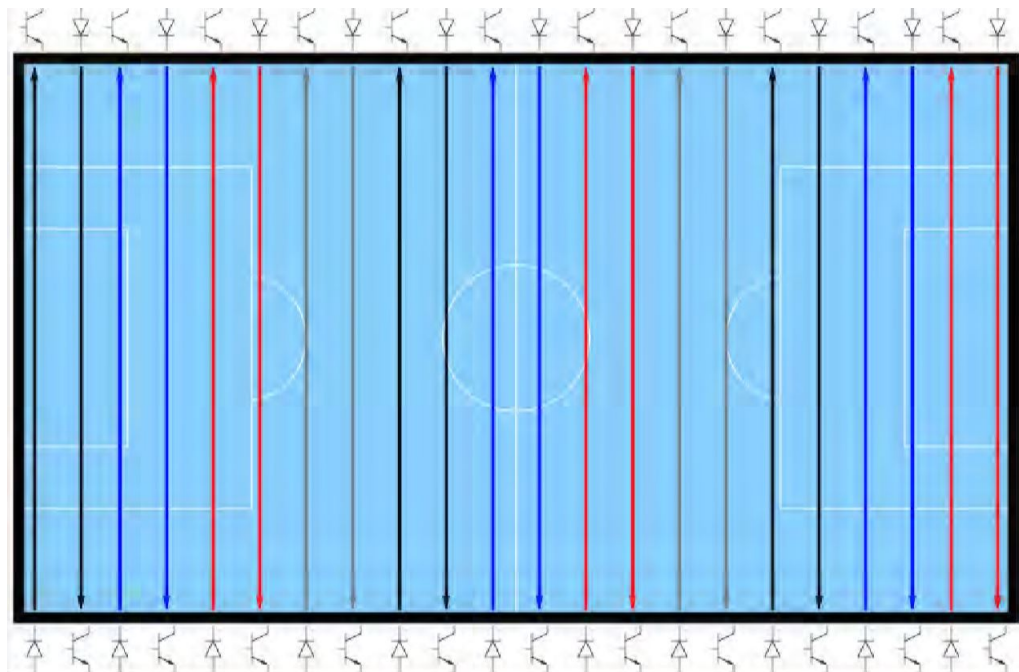
Obr. 2.2: Diagram strategie RSF KiRo.[2]

- DefaultAction: Posuň a natoč osu do základní pozice.
- KickBall: Otoč osu o 90° a kopni do míče.
- MoveKickBall: Přesuň osu s míčem zaklenutým o podlahu do strany a po krátké pauze otoč osu o 360° pro vykopnutí míče vpřed.
- BlockBall: Přesuň osu tak, aby hráč zastavil míč.
- ClearBall: Přemísti osu do stejné pozice jako BlockBall, ale natoč ji tak, aby hráč pustil míč zezadu.
- BlockAtPos: Přesuň osu tak, aby hráč zabránil průchodu míče na určité pozici.
- ClearAtPos: Posuň osu na konkrétní pozici a natoč ji tak, aby hráč pustil míč zezadu.

Popsaná strategie nijak neuvažuje pohyb os protihráče, pouze detekuje pozici míče a odkopne jej na soupeřovu bránu, pokud je v dosahu některé z herních os. Přes jednoduchost této strategie byly zaznamenány úspěchy i proti zkušeným hráčům.[2, 3, 4]

## 2.2 The University of Akron

Řešení vzniklé na univerzitě v Akronu vyniká hlavně způsobem detekce míčku - na hrací ploše je vytvořena síť pomocí dvojic IR LED - fototranzistor s rozestupy 1 cm. Pro zamezení rušení v podobě osvětlení fototranzistoru jinou IR LED jsou dvojice střídány, obě části dvojice jsou zapuštěny do stěn stolu a ke spínání LED nedochází zároveň, nýbrž průběžně. Díky tomu jsou 2 sepnuté LED vždy 32 cm daleko. Podobné řešení zvolil i tým studentů z Adelaine University [7]. Taktika se



Obr. 2.3: Detekce míčku pomocí sítě IR LED - fototranzistor.[6]

při útoku spoléhá opět pouze na sílu motorů a jednoduše vystřelí balón směrem vpřed, pokud je detekován v blízkosti některé z os.

Při bránění systém užívá tři taktiky:

1. Jednoduché sledování pozice míče: To je využito v případě, že se míč nachází za osou směrem k domovské bráně. Herní figury se pak nacházejí v ideální pozici pro odkopnutí balónu v dosahu.
2. Defensivní sledování míče: Určeno pro situaci, kdy protihráč drží míč.
  - (a) Útočné osy jsou vždy stavěny mezi míč a střed brány pro maximální vykrytí plochy. Jestliže se hráč první osy přibližuje k maximu svého dosahu a je potřeba provést výměnu, hráč druhé osy stále brání míč po čas průběhu výměny a naopak.
  - (b) Obranné osy se vždy snaží vykryt co největší část prostoru, jímž by mohla střela projít. Ten je vymezen přímkami vedenými od míče k rohům brány.

Obránce, resp. gólman je umístěn do  $1/3$  vzdálenosti mezi přímkami blíže k resp dále od balónu.

3. Protnutí trajektorie: Pokud soupeř vystřelí, je vypočítána dráha střely a všechny osy jsou nastaveny tak, aby hráči míč zastavili. Tento výpočet uvažuje i odrazy.

[6]

## 2.3 Brigham Young University

Stůl vznikl jako výsledek studentského projektu zaměřeného na řízení pomocí umělé inteligence. Systém k detekci polohy míče i hráčů využívá webkameru zavěšenou nad hrací plochou. Na začátku studenti testovali více algoritmů strategie a nakonec vybrali nejlepší z nich. Ten je schopen se od svého protivníka učit a postupným trénováním byla rychlost a přesnost reakcí robotu dovedena na takovou úroveň, že protivníci mají problém držet krok.[8, 9]



Obr. 2.4: Výsledný stůl z Brigham Young University.[8]

## 2.4 Eidhoven University of technology

Projekt této univerzity vznikl pro účely výzkumu počítačového vidění a umělé inteligence. Na konci byla automatizována jen jedna osa. Zajímavé je na tomto projektu vyřešení problému s překrýváním míče osami a herními figurami. Program na základě úhlu natočení a pozice herních figur je vypočítá masku, kterou odečte od

nasnímaného obrazu. Přepočet je natolik přesný, že i při velice rychlých pohybech osy dojde ke kompletnímu odstranění obrysu herních figur z obrazu a je tak možné snadno nalézt polohu míčku.[1]

## 2.5 Pilz GmbH & Co. KG

RSF vznikl pro propagační účely firmy Pilz GmbH & Co. KG a je celý vytvořen pouze z produktů této firmy. Poloha míčku je snímána zpod hrací plochy. Strategie se opět drží již ověřeného systému, propracované obrany a jednoduchého útoku. [10, 11]



Obr. 2.5: Výsledné řešení firmy Pilz GmbH & Co. KG.[8]

## 2.6 Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Z pohledu taktiky RSF napodobuje předchozí příklady. Poloha míčku snímá kamera zespodu skrz průhlednou herní plochu, v čemž je stůl jedinečný, avšak v ukázalo se, že je toto řešení není vhodné při hře s lidským protivníkem, neboť pohyblivé části stolu hráče značně rozptyluje. Vedoucí projektu však plánuje v budoucnu robotizovat i druhou stranu stolu, aby bylo umožněno soutěžení mezi různými strategiemi hry.

Dalším zajímavým prvkem stolu je snímání polohy a natočení soupeřovy osy, to je zobrazeno na obrázku 2.6. Plastový nástavec má tvar šneka se značným stoupáním a snímá jej dvojice snímačů vzdálenosti, jeden ve středu bez stoupání a druhý na okraji s stoupáním. Získané vzdálenosti slouží k výpočtu posunu a natočení herní osy, což lze použít při implementaci pokročilejších strategií. Nevýhodou je značná cena systému. [12]

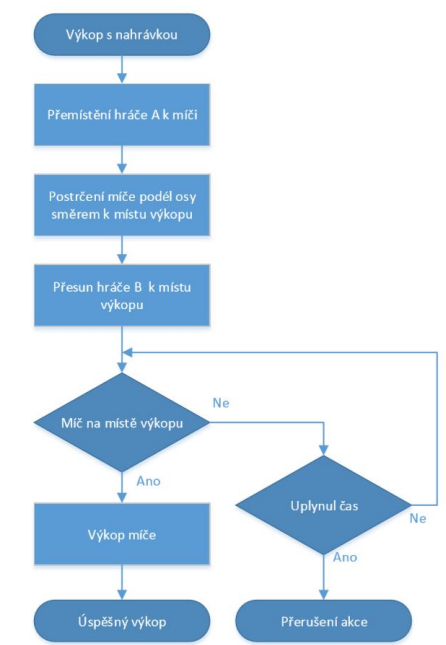


Obr. 2.6: Snímání polohy[28]

## 2.7 České vysoké učení technické

Řešení vyvinul v roce 2015 formou diplomové práce [5], který celý projekt vystavěl na platformě Siemens. Výsledkem byl stůl s jednou automatizovanou osou, snímající polohu hracího míčku shora. Tento projekt jako jediný implementoval přihrání míče jinému hráči v rámci osy. To je využito v případě, že hráč držící míč není schopen přímo vystřelit na bránu. Program analyzuje pozici míče a soupeřových hráčů, naplánuje ideální trajektorii a provede potřebné operace. Algoritmus pohybu je zobrazen na obr. 2.7.

V rámci práce je rozebrána i možnost šikmé střely, avšak je zavrhnuta z důvodu velké nepřesnosti v souvislosti s opotřebením hráčů. [5]



Obr. 2.7: Algoritmus přihrávky implementovaný v [5]

## 2.8 Shrnutí

Všechny výše zmíněné projekty používají identickou strategii hry zastavení míč a vykopnutí ve směru soupeřovy brány. Liší se hlavně způsobem detekce polohy míče a konstrukčním provedením robotizace os.

Jistým způsobem vystupuje [5]. Je zde uvažována možnost, že trajektorie hracího míče neprotíná s branou soupeře. V tom případě dojde k přihrání míče herní figuře na stejné ose, která již může na bránu vykopnout.

Velice zajímavý je i přístup Brigham Young University, kde studenti pro zlepšení herních schopností robota používají strojové učení. Zejména pro zpřesnění reakcí.

### 3 Současný stav RSF firmy B&R

Konstrukce stolu byla tématem bakalářských a diplomových prací v akademickém roce 2015/2016, kdy byli v rámci [34, 33] vybrány stolní fotbal, lineární a rotační motory, navrhnutý uchycení motorů, detekce polohy míčku a gólu a také robotizována jedna osa.

V akademickém roce 2017/2018 byla realizována detekce pozice míče zpod hrací plochy pomocí průmyslové kamery COGNEX IN-SIGHT 7000 spolu s nosnou konstrukcí pro osvětlení [36], určení polohy a natočení os protihráče [31] a první pokročilá herní strategie [32].

V akademickém roce 2018/2019 na herním stole pracovalo celkem 5 studentů na bakalářských pracech:

1. [28] - Řízení robotizovaných os
2. [29] - Framework, vizualizace
3. [27] - Herní strategie
4. [30] - Optimalizace snímání hrací plochy kamerou COGNEX IN-SIGHT 7000
5. [35] - Detekce polohy hracího míčku pomocí Raspberry pi

Tyto projekty budou stručně shrnuty v následující částech zabývajících se danými částmi.

#### 3.1 Konstrukce

Kvůli určení stolu pro reklamní a prezentační účely a tudíž potřebu stůl opakovaně rozebírat a převážet, byla konstrukce stolu rozdělena na dvě části. Konkrétně byl navržen pojízdný kabinet, obsahující elektroniku, řídicí jednotky, veškerou kabeláž, pohony os, panel s obrazovkou a konstrukce pro osvětlení a kamery. Kabinet je zkonstruován z lehkých hliníkových profilů a je opatřen koly s brzdami pro usnadnění převozu. Rozložení i složení však zabere několik hodin, kvůli vysokým nárokům na rovnost podlahy a přesnosti uložení motorů vůči osám. Kabinet je zobrazen na obr. 3.1.

#### 3.2 Pohony

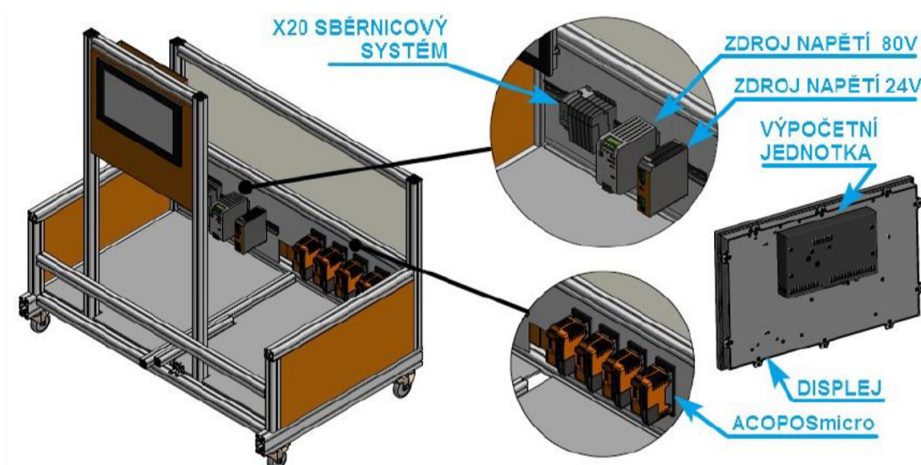
Ing. Petr Mareček také navrhl upevnění všech 4 pohonů k nohám stolního fotbalu (obr. 3.2).

Návrh byl později upraven Ing. Romanem Parákem, kvůli zadrhávání lineárního motoru a uvolňování osy při vysokých otáčkách.

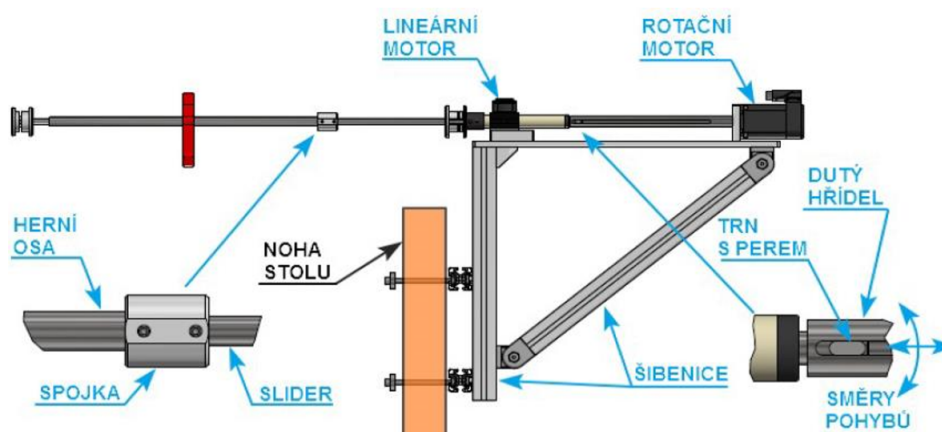
Výběr motorů byl po zátěžové zkoušce ponechán.

- 4x lineární motor P01-23x80 od firmy LinMot





Obr. 3.1: Pojízdny kabinet.[34]



Obr. 3.2: Uchycení motorů navržené v [34]

- 4x rotační motor 8LVA23.B1030D100-0 od firmy B&R
- 2x digitální servoměnič ACOPOS Micro 80VD100PD.C000-01 pro rotační motory
- 2x digitální servoměnič ACOPOS Micro 80VD100PD.C188-01 pro lineární motory

Bc. Ondřej Sláma ve své práci ([28]) realizoval modul pro řízení motorů, jehož vstupem je žádaná poloha a časový interval, v němž má být pozice dosažena. Z těchto veličin je generován akční zásah v podobě požadované rychlosti zadávané do regulátoru, realizovaném v servopohonu. Tento postup byl zvolen kvůli dynamice herních os a lineárních motorů, která způsobovala otřesy celé konstrukce při častých změnách požadované polohy. Použitý algoritmus bude přiblížen později.

### 3.3 Bezpečnost

Pro bezpečnost představuje hlavní problém poranění v případě zásahu lidského hráče rukou do hrací plochy (např. v rámci postrčení míče mimo dosah herních os). Tento problém byl vyřešen pomocí optické brány. V případě jejího přerušení dojde k zastavení hry a zabrzdění všech motorů.

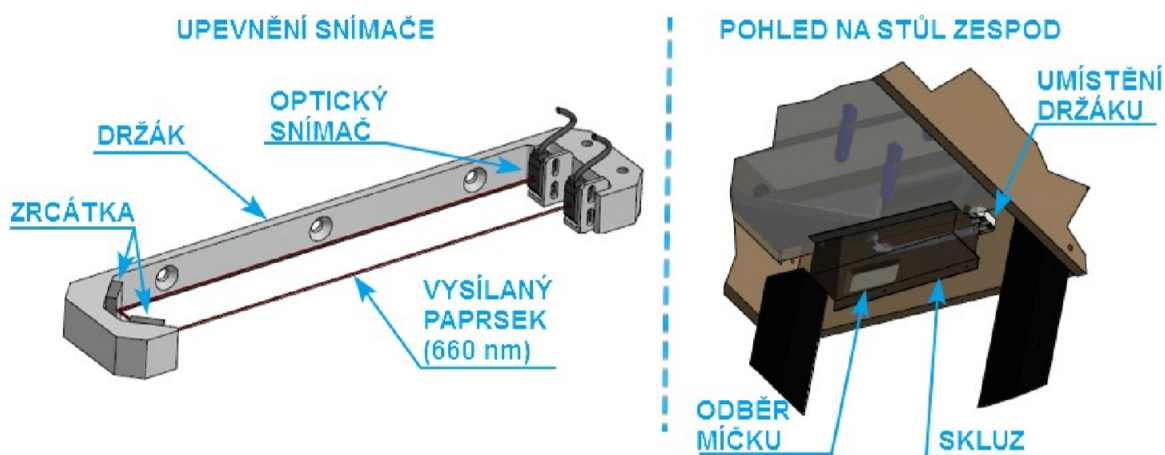
Bylo instalováno i *E-Stop* tlačítko, umístěné vedle ovládacího panelu pro případ jakýchkoli dalších nečekaných komplikací.

### 3.4 Detekce míčku

První verze detekce míčku, realizovaná v [36], detkovala polohu míčku zpod hrací plochy. Tento postup byl pokus pro vyřešení problému s detekcí míče pod herními figurami a osami. Nerovnoměrnost osvětlení způsobila problém s nalezením míče na okrajích, které jsou zvýšené pro zamezení zastavení míče v dané oblasti. Bc. Simona Sijková proto přesunula kameru nad hrací plochu a díky optimalizaci algoritmu bylo dosaženo až dvojnásobné rychlosti detekce polohy. [30]

Paralelně s řešením [30] byla realizována detekce míčku pomocí dvojice počítačů Raspberry-Pi s kamerami. Poloha míče je určena za pomoci algoritmu hledání barevného bodu a souřadnice v pixelech odešle na PLC, kde poté vypočte odpovídající polohu v *unitech* (1 unit = 0,1 mm), se kterými program počítá. Při prezentacích je používáno toto řešení, neboť dosahuje rychlosti až 38 fps a přesnosti 3mm. [35]

Detekce gólu je řešena pomocí světelné závory (obr. 3.3). Přerušení závory je vyhodnoceno jako gól.



Obr. 3.3: Detekce gólu.[34]

## 3.5 Strategie

Bc. Pavel Vaverka navrhl a realizoval dvě strategie, Strategii A a Strategii B. Později byla na základě Strategie B vytvořena Strategie C, která disponuje vylepšeními v oblasti obrany. Strategie jsou realizovány jako třídy v jazyce C++, využívající rodičovskou třídu `IBaseStrategy`. Protože jsou nyní na stolním fotbalu používány Strategie B a C, budou krátce představeny.

### 3.5.1 BaseStrategy

Rodičovská třída `BaseStrategy` obsahuje základní úkony, potřebné pro funkci všech strategií, jako je zpracování dat z kamer nebo výpočet poloh herních os na základě požadované polohy některé z herních figur.

### 3.5.2 Strategie B

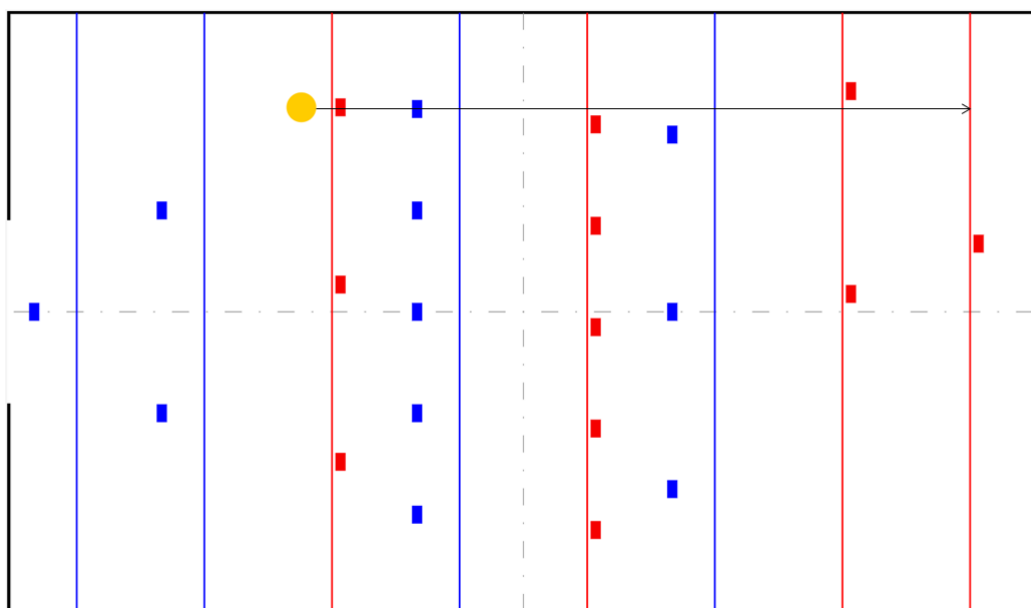
Strategie B má obranný charakter, kdy se RSF snaží zabránit vstřelení branky přemístěním herních figur do trajektorie, vypočtené na základě dat z kamery. Pokud se míč nachází před u herní osy soupeře nebo je pozice míče neznámá, kopíruje strategie pohyby herních os soupeře.

Pokud je míč detekován před figurou jedné z herních os RSF, dojde k odpoknutí míče směrem k soupeřově bráně. Herní osy mezi míčem a soupeřovou bránou jsou vždy zdviženy.

### 3.5.3 Strategie C

Oproti předchozí strategii, tato strategie při obraně využívá pyramidové rozestavení. Pokud je známa pozice a vektor rychlosti míče, je nejbližší osa přesunuta na pozici, kde se trajektorie míče s danou osou protíná. Zbylé dvě osy se snaží zvětšit šířku obranné formace, postavením svých herních figur po stranách první herní figury. Zobrazeno na 3.4.

Figura brankáře je vždy postavena do místa protnutí její herní osy a trajektorie míče.



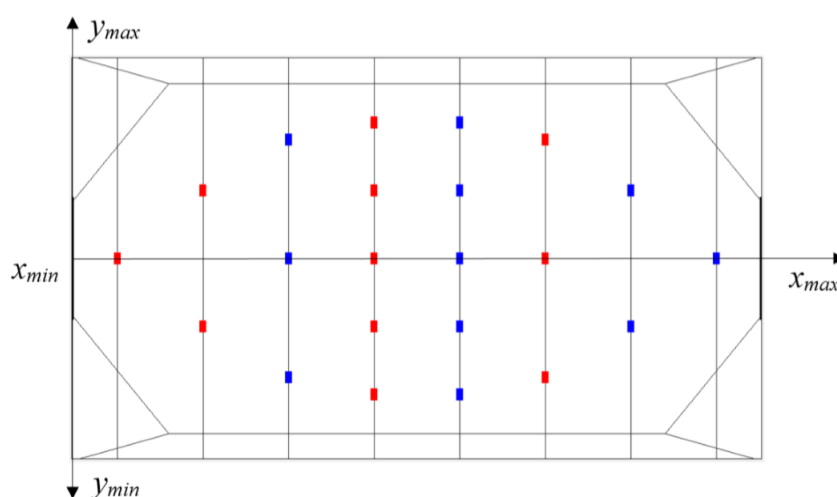
Obr. 3.4: Pyramidové rozestavení hráčů.[27]

## 4 Rozbor nedostatků současného řešení RSF firmy B&R

V předchozí kapitole byl popsán současný stav RSF. Řešení, i když úspěšné, trpí několika nedostatky a nabízí místa k rozvinutí jeho schopností. Nyní budou některé z těchto nedostatků analyzovány a bude navrženo jejich řešení.

### 4.1 Omezení strategie

Nyní implementovaná strategie [27] převážně spoléhá na rychlost reakce RSF a sílu servomotorů, díky níž dokáže odpálit míč mnohem rychleji, nežli lidský protivník. Tento způsob hry se osvědčil i v případě jiných projektů proti nezkušeným a lehce pokročilým hráčům. Taktika však vůbec neřeší situaci, kdy se míček nachází mimo  $y$  souřadnice brány. Nákres hracího hřiště můžeme vidět na obr. 4.1, kde  $x_{min} = 0$  cm,  $x_{max} = 118$  cm,  $y_{min} = -34$  cm a  $y_{max} = 34$  cm. Brána, zvýrazněná tlustou čarou, má 18cm na šířku.



Obr. 4.1: Schématický nákres hřiště.[27]

Pro vyřešení výše zmíněné situace byla navržena dvě řešení:

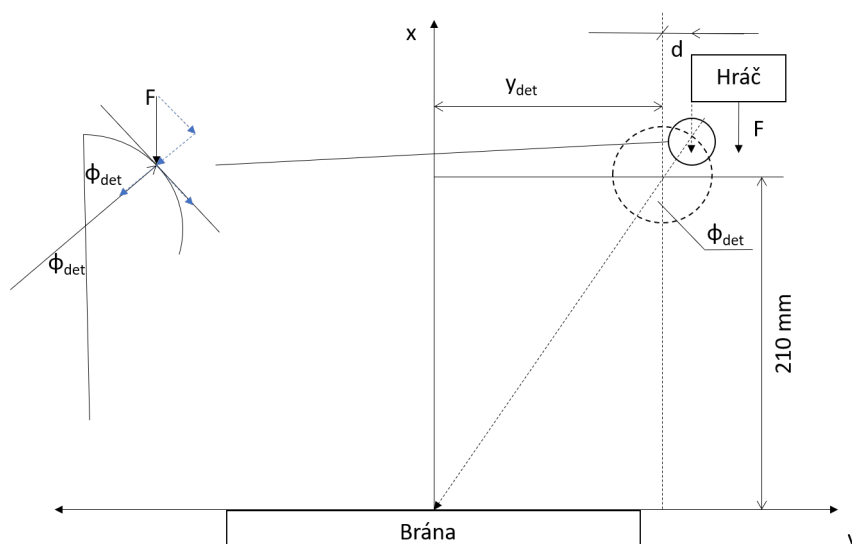
1. Střela pod úhlem
2. Přihrávkou do strany a následným výstřelem

### 4.1.1 Střela pod úhlem

Možnost použití této metody je podmíněna dostatečnou přesností detekce polohy míčku a nastavení pozice herních figur. Pro zjednodušení výpočtů uvažujeme následující podmínky:

- Hrací míček je dokonale kulatý s těžištěm uprostřed a rovnoměrným rozložením hustoty a poloměrem  $r = 17 \text{ mm}$ .
- Podstava hráče, sloužící pro úder byla nahrazena obdélníkem - ve skutečnosti vlivem opotřebení časem dojde k otupění hran, což může výrazně ovlivnit přesnost střely.
- Hráč se míčku dotkne přesně ve vzpřímené poloze.
- Kvůli velkým požadavkům na přesnost bude šikmá střela navržena a implementována pouze pro osu nejbližší k bráně soupeře.
- Vzdálenost míče od brány v ose  $x$ , splňující tyto podmínky byla naměřena na  $210 \text{ mm}$ .

Schématický náčrt situace splňující tyto podmínky je zobrazen na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Schématický náčrt pro výpočet vzdálenosti  $d$

Jednotlivé veličiny jsou definovány následovně:

- $y_{det} [\text{mm}]$ ...detekovaná poloha míčku
- $d [\text{mm}]$ ...vzdálenost mezi těžištěm míčku a bližší hranou podstavu hráče
- $\phi_{det} [\text{rad}]$ ...úhel střely

Při kontaktu hrany hráče s míčkem, je výsledná síla, působící v jiném, než kolmém směru na plochu míčku, vždy rozdělena na 2 složky. První část působí kolmo na danou plochu, a protože uvažujeme míček dokonale kulatý, bude tato síla vždy

směřovat do jeho středu a určovat jeho výsledný směr. Druhá složka bude působit ve směru tečny na plochu míčku v místě nárazu a dává tak balónku rotaci. Ta by se měla projevit až po překročení vzdálenosti  $d$  a pro teoretické výpočty bude zanedbána. Zvětšená část obrázku, zobrazuje detail doteku hráče s míčkem, a je zde možno tyto složky vidět.

Na zvětšeném obrázku lze také vidět úhel  $\phi_{det}$ , překlopený přes střed. Na straně blíže hráči lze úhel vyjádřit jako:

$$\phi_{det} = \arcsin\left(\frac{d}{r}\right) \quad (4.1)$$

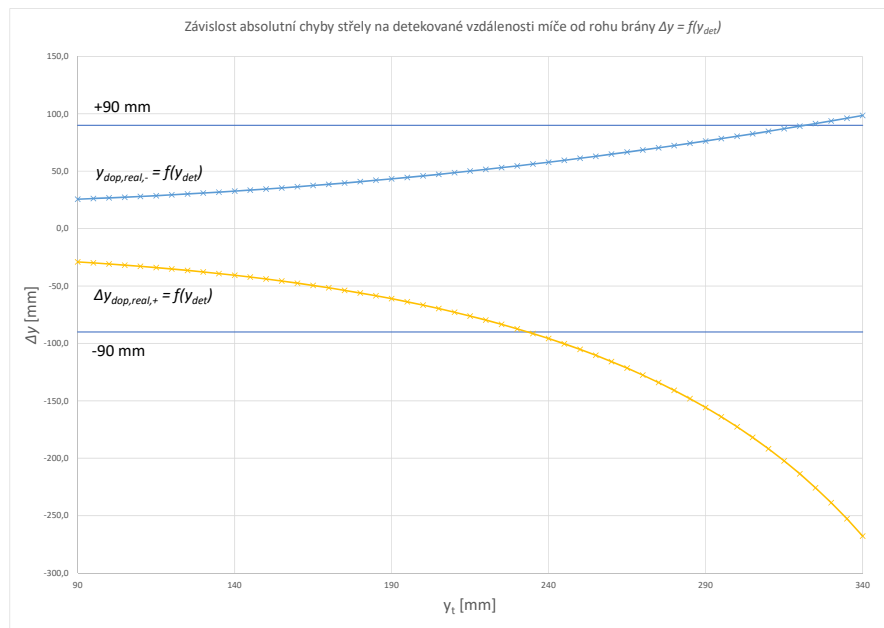
A na straně blíže brány:

$$\phi_{det} = \arctan\left(\frac{y_{det}}{210}\right) \quad (4.2)$$

Porovnáním dostaneme vztah pro určení potřebné  $d$  pro danou vzdálenost  $y_{det}$ , a sice:

$$d = r \sin\left[\arctan\left(\frac{y_{det}}{210}\right)\right] \quad (4.3)$$

Na základě tohoto vztahu byla vytvořena závislost  $d = f(y_{det})$ , při  $y_{det} \in < 90; 240 >$ , (obr. 4.3) neboť do vzdálenosti středu míčku od  $|y_{det} - y_{min}| < 90$  mm lze vstřelit gól přímou střelou.

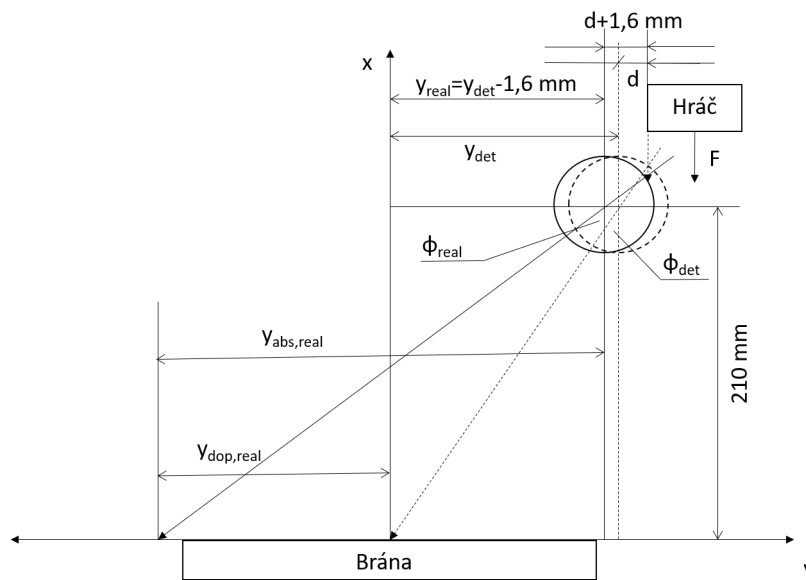


Obr. 4.3: Závislost potřebného odstupu na vzdálenosti míče od rohu brány. 4.3

Odvozený vztah je však platný pouze pokud známe  $y_{det}$  naprosto přesně, což však v praxi není možné. Na základě [35] byla určena citlivost detekované polohy

míčku 3 mm/px, což znamená, že poloha míčku se může lišit o  $\pm 1,5$  mm. K tomu je třeba připočíst minimální krok pro nastavení motoru - 0,1 mm. Takto získáme maximální absolutní chybu vzájemné pozice hráče a míčku  $\Delta_{MAX} = \pm 1,6$  mm. Je tedy potřeba zjistit, zda je možné realizovat střelu takovým způsobem, aby trefila bránu.

Protože pracujeme s již přepočítanou polohou, má nejistota polohy míčku rovnoměrné rozložení, a proto je šikmá střela vždy počítána tak, aby ideálně mířila na střed branky. Získáme tak co nejvíce prostoru pro chybu a v závěru ji můžeme využít v náš prospěch, neboť pokud my netušíme, kam přesně míč poletí, nemůže to vědět ani soupeř. Pro naše účely postačí, pokud střela při uvažování obou maximálních odchylek skončí v bráně, tedy pokud  $y_{dop,real} \in \langle -90; 90 \rangle$ . Výpočet dopadu míče pro jeden z případů maximální vstupní chyby je naznačen na obr. 4.4.



Obr. 4.4: Schématický náčrt hřiště.

Nové proměnné z nákresu jsou definovány takto:

- $y_{real}$  [mm]...reálná poloha míčku, v tomto případě  $y_{real} = y_{det} - 1,6$
- $y_{abs,real}$  [mm]...absolutní vzdálenost mezi reálnou polohou míčku a místem reálného dopadu
- $y_{dop,real}$  [mm]...absolutní vzdálenost mezi středem brány a místem reálného dopadu
- $\phi_{real}$  [rad]...reálný úhel střely

Z nákresu lze vidět, že při výpočtu  $y_{dop,real}$  je třeba s posuvem počítat dvakrát. Nejprve určíme správnou vzdálenost mezi středem míčku a hranou hráče:

$$d_{real} = d + 1,6 \quad (4.4)$$



Tento výpočet platí pokud je balónek ve skutečnosti posunut doleva oproti  $y_{det}$ , neboli:

$$y_{real} = y_{det} - 1,6 \quad (4.5)$$

V případě posunu míčku na druhou stranu se obě znaménka otáčejí. Následně určíme reálný úhel střely:

$$\phi_{real} = \arcsin\left(\frac{d_{real}}{r}\right) \quad (4.6)$$

Pokračujeme určením  $y_{abs,real}$ :

$$y_{abs,real} = 210 \cdot \tan(\phi_{real}) \quad (4.7)$$

a nakonec vypočteme  $y_{dop,real}$ :

$$y_{dop,real} = y_{real} - y_{abs,real} \quad (4.8)$$

Tímto postupem byly vypočteny maximální výstupní chyby  $\Delta y_R$  resp.  $\Delta y_L$  pro střelu končící u pravé resp. levé tyče branky v pravé polovině hřiště. Obě chyby byly vyneseny v závislosti na  $y_{det}$  do společného grafu (obr 4.5). Dvě vodorovné přímký označené  $+90$  a  $-90$  značí hranice branky a lze pomocí nich určit, které střely by i při maximální možné chybě skončily v brance. Na základě grafu můžeme tedy usoudit, že šikmá střelba je na útočné ose s nynější přesností použitelná do 230 mm od středu brány na obě strany.

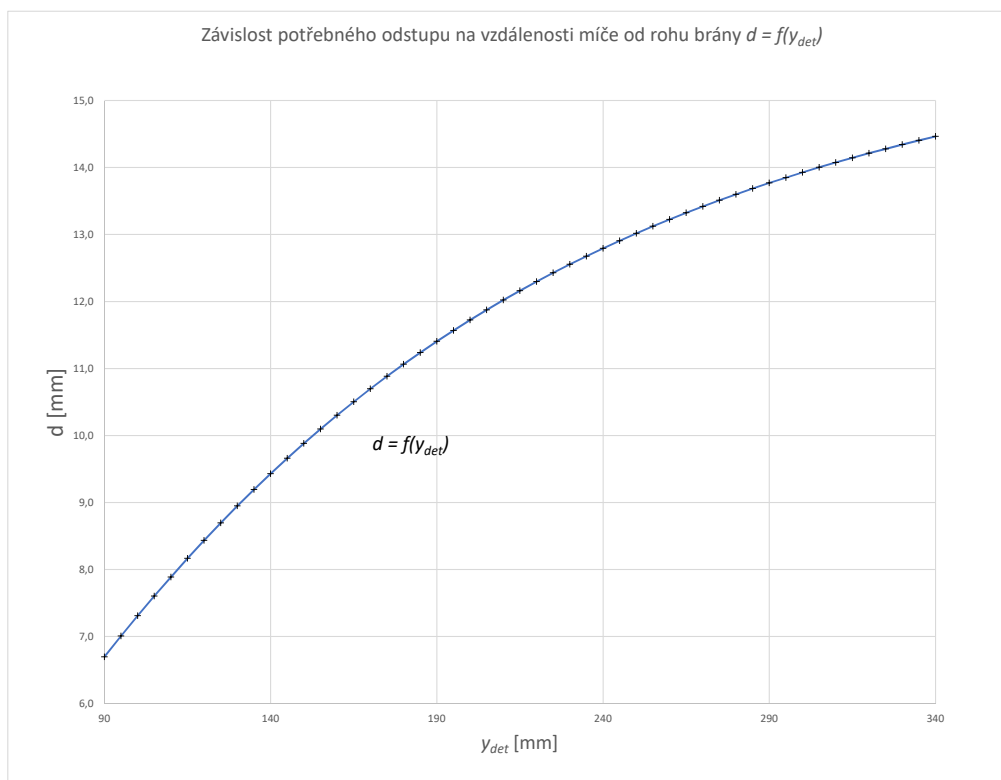
Proměnné na obr. 4.5:

- $y_{dop,real,+}$  absolutní vzdálenost mezi středem brány a místem reálného dopadu při  $d_{real} = d + 1,6$
- $y_{dop,real,-}$  absolutní vzdálenost mezi středem brány a místem reálného dopadu při  $d_{real} = d - 1,6$

## 4.1.2 Přihrávka do strany

Přihrání míče do boku a následné vystřelení na bránu již realizoval Ing. Myslivec v [5]. Diagram použitého algoritmu je zobrazen na obr. 2.7. Za předpokladu úspěšného zachycení míče lze úlohu rozdělit na následující kroky:

1. Určení vhodného cíle v rámci prostoru brány, na jehož základě jsou vybrány figury, které akci vykonají.
2. Osa vykonávající přihrávku je pootočena do polohy  $45^\circ$  aby se zamezilo doteku s míčem.
3. Figura hráče vykonávajícího přihrávku z předchozího kroku je posunuta na takovou pozici, aby byla schopna dosáhnout rychlosti  $v_{př}$ ...rychlost přihrávky.
4. Osa je natočena tak, aby při pohybu v ose  $y$  došlo ke kontaktu s míčem plochou podstavky.



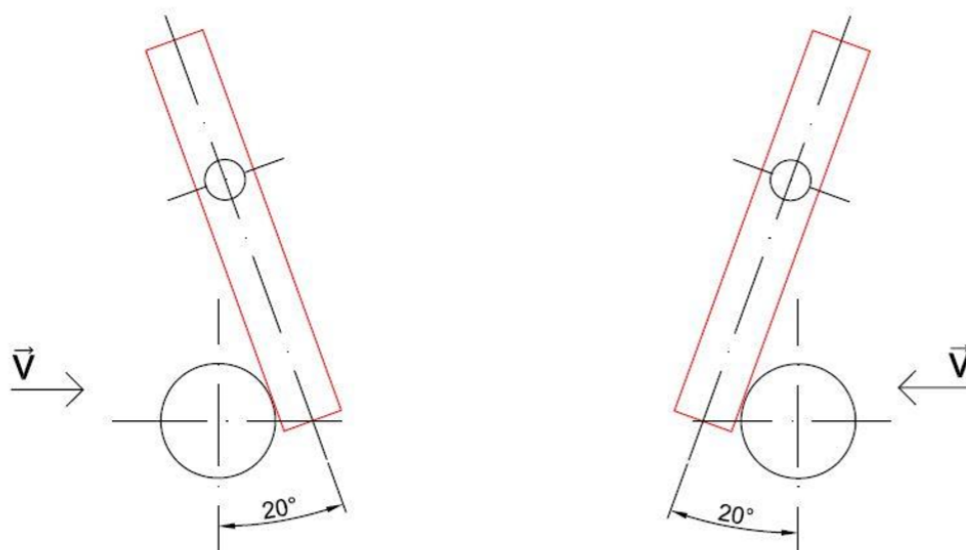
Obr. 4.5: Závislost potřebného odstupu na vzdálenosti míče od rohu brány.

- Osa je posunuta pevně danou rychlostí (určenou empiricky na základě rychlosti pohybů osy) ve směru přihrávky. Dobu pohybu lze odhadnout  $t_{pos} = \frac{|y_{míče} - y_{fig1}|}{v_{př}}$ ,  $y_{míče}$ ...změřená poloha míč,  $y_{fig1}$ ...změřená pozice přihrávající herní figury
- Natavení střílející herní figury na pozici  $y_{fig2}$ ...vypočtená pozice odkopu a natočíme osu do náprahu na střelu.
- V čase  $t_s$  vypočteném podle  $t_s = \frac{|y_{míče} - y_{fig1}|}{v_{míče}}$  provedeme výstřel.

### 4.1.3 Zachycení míče

Obě předchozí řešení vyžadují znát přesnou polohu míčku i jeho směr a rychlost, jestliže mají být provedeny v pohybu. Přesnost 3 mm však není pro dané účely dostatečná. Míč je potřeba nejprve dostatečně zpomalit nebo zastavit a až poté vypočítat parametry potřebné k provedení pohybu. Pro zastavení míče lze obecně použít dvě metody, zachycení a přitlačení.

Nákres pro zachycení míče lze vidět na obr. 4.6. Provedení je poměrně jednoduché - hráč je natočen o  $35^\circ - 40^\circ$ . Tím je zabráněno prudkému odrazu míče od herní figurky.



Obr. 4.6: Natočení herních figurek pro zachycení míčku.[27]

Přítlačení spočívá v prudkém přikrytí míčku shora kontaktní částí herní figurky. Tato metoda však není pro RSF vhodná kvůli vysokým požadavkům na koordinaci pohybu a nedostatečnou citlivostí na změnu momentu natočení, která by měla za následek opotřebení rotačních motorů.

Ani jedna z fungujících strategií míč nezastavuje, protože nakloněním figury hráče dochází ke snížení blokovací plochy a zpomalení detekce míče. Z těchto důvodů jsou figury hráče v rámci obrany vždy ve vzpřímené poloze a míček pouze odpálí ve směru protihráčovy brány.

#### 4.1.4 Kopírování y souřadnice míče

Při vysokých rychlostech míče v ose  $y$  dochází ke zpoždění osy oproti míčku, což ve výsledku zapříčiní, že herní figury robotizovaných os nestojí mezi míčem a brankou.

Tento nedostatek je způsoben špatným navržením algoritmu pro řízení polohy os v závislosti na poloze herního míčku, implementovaným v modulu strategie. Herní osy nejsou řízeny, nýbrž ovládány, neboť modul strategie nebere nijak v potaz rozdíl mezi žádanou a dosaženou hodnotou, pouze modulu pro řízení os předává zpracovanou polohu míče s malou korekcí, úměrnou  $y$  složce rychlosti míčku.

#### 4.1.5 Pyramidová formace

Pyramidová formace vždy zaujme stejné pozice:

1. Osa útočníků je postavena přímo do cesty míči.

2. Osa zálohy je postavena tak, aby zakryla prostor vedle figury útočníka blíž ke středu herní plochy.
3. Osa obrany je postavena tak, aby zakryla prostor vedle figury útočníka dále od středu herní plochy.

Tento postup je například neefektivní v případě, že se míč nachází mimo oblast brány. V takové situaci je výhodnější využít všechny osy pro maximální pokrytí prostoru brány.

Jednotlivé figury jsou pozicovány tak, aby v ose  $y$  stály vedle sebe. To je neefektivní, neboť při rozšíření rozestupů, na hodnotu nižší než je průměr míče je možné pokrýt větší plochu s přijatelnou ztrátou obranných schopností.

## 4.2 Omezení výhledu kamer

Jak už bylo výše zmíněno, detekci polohy míčku obsluhuje dvojice kamer Raspberry Pi kamera V2, každá připojená k samostatnému Raspberry Pi 3 Model B+. Kamery určí pozici míčku v pixelech a odešlou údaj pomocí UDP do PLC, kde je údaj dále zpracován. Kamery jsou umístěny na konstrukci pro osvětlení. Díky výrazně odlišné barvě míčku od ostatních prvků lze s výhodou využít algoritmus pro nalezení barvy v obrazu.

Slabinou řešení je však nalezení míčku, pokud je zakryt herní figurou ve nakloněné poloze. V případě B&R je tento problém z jisté části vyřešen pozicováním os tak, aby míč nezakrývali.

## 4.3 Řízení motorů

Modul řízení motorů, realizovaný Bc. Slámou v [28] využívá bloků *MpAxisBasic* a *MpAxisCyclic*, operujícím na jádře ACP10. Bloky nabízí možnost kompaktního řízení osy nakonfigurované v AS. Pomocí bloku *MpAxisCyclic* lze osu řídit pomocí požadované rychlosti, polohy nebo momentu. Modul jako vstupní veličinu přijímá požadovanou polohu s časovým intervalem, za který musí lineární motor pozice dosáhnout. Z těchto parametrů potom určí požadovaná rychlost.

Takto určená rychlost je poté ještě upravena, aby zamezila otřesům konstrukce stolu, způsobených hybností lineárních motorů. Tento problém by však bylo možné vyřešit i změnou parametrů servo měniče. Konkrétně parametru  $t\_jolt$ , který ovlivňuje diferenci zrychlení.

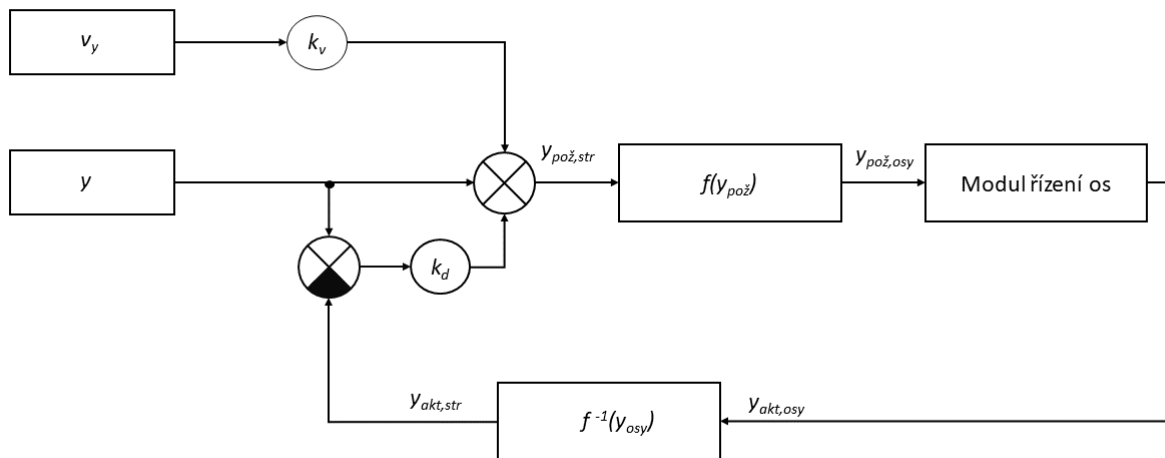
Všechny výše zmíněné řešení byly implementovány a otestovány v simulaci. Testování na reálném modelu nemohlo být provedeno, protože model RSF se nacházel

v rozebráném stavu a pro opětovné složení je potřeba školených pracovníků, kteří neměli v danou dobu čas.

## 5 Implementace řešení nedostatků a jejich zhodnocení

### 5.1 Kopírování $y$ souřadnice míče

Strategie C byla upravena tak, aby pro kopírování  $y$  souřadnice míčku využívala zpětné vazby a byl realizován jednoduchý P regulátor s korekcí závislé na  $y$  složce rychlosti míčku 5.1. Jisté zlepšení vlastností lze sledovat ve video příloze srovnání\_regulace.mp4. Pokud se ovšem podíváme na graf průběhu odchylky žádané hodnoty v Příloze A (A.1 A.2), lze u průběhu se zavedenou zpětnou vazbou vidět velké kmitání, které bylo přítomné i na průbězích požadované veličiny. Filtrační vlastnosti algoritmu předzpracování žádané hodnoty toto kmitání sice z větší části utlumí, ale i tak takové chování není žádoucí a svědčí o špatně nastaveném regulátoru, nebo jiné chybě při výpočtu žádané hodnoty. Při bližším prozkoumání průběhů lze zjistit, že urychlení přechodného děje zanedbatelné a v závěru je pouze zmenšena trvalá odchylka.



Obr. 5.1: Schéma regulace poloh os v modulu strategie

- $v_y$  ...  $y$  složka rychlosti míčku
- $k_v$  ... koeficient rychlostní korekce

- $y$  ... momentální  $y$  souřadnice míčku
- $k_d$  ... zesílení P regulátoru
- $y_{pož, stř}$  ... souřadnice, na níž má daná osa přesunout libovolnou figuru hráče
- $f(y_{pož, stř})$  ... funkce, určující požadovanou polohu osy na základě požadované polohy libovolné figury
- $y_{pož, osy}$  ... požadovaná poloha osy
- $y_{akt, osy}$  ... aktuální poloha osy
- $y_{akt, stř}$  ... aktuální souřadnice vybrané figury

## 5.2 Úprava modulu řízení motorů

Pro implementaci střely s přihrávkou a pozdější testování na reálném modelu bylo potřeba upravit Modul řízení os tak, aby bylo možné z modulu strategie zadávat požadovanou rychlost nebo polohu, bez úpravy požadovaných původním algoritmem řízení.

Interní struktura Modulu řízení os byla rozšířena o členy potřebné pro přepínání mezi původním algoritmem řízení a přímým předáváním hodnot. Dále byly upraveny jednotlivé části modulu:

- AxisCtrl: Byl upraven stavový automat, konkrétně funkce pro inicializaci lineárních os.
- AxisCtrl: Byla napsána funkce, která cyklicky kontroluje a dle potřeby mění nastavení funkčního bloku *MpAxisCyclic*
- DynamicOpt: Byl upraven program pro zpracování hodnot z Modulu strategie

Výše uvedené úpravy byly odlazeny v simulaci a jsou využívány u střely s přihrávkou. V ostatních případech je stále využíván již originální algoritmus pro řízení, neboť přímé předávání hodnot vyžaduje úpravu parametrů plánovače trasy všech os, kterou nebylo možné provést bez přístupu k sestavenému modelu. Dalším důvodem pro užívání původního algoritmu je, že v některých případech byla při použití přímého předávání hodnot odchylka mezi žádanou a aktuální pozicí osy výrazně vyšší, než u původního algoritmu. Odchylka však může být způsobena i chybou v simulaci osy, neboť chyba se projevuje vždy ve stejné situaci a proto, že původní regulace s identickými vstupními daty funguje správně.

## 5.3 Střela pod úhlem

Výše navržený matematický popis střely pod úhlem je dostačující pro přibližné vystřelení na bránu z místa, pokud je míč v klidu. V rámci hry je však výhodnější zastavený míč přihrát do boku a vystřelit přímo na bránu. Střelu pod úhlem lze

však využít k nasměrování míče blíže k oblasti brány v případě, že se nachází mimo ni a pohybuje se příliš rychle na pokus o zastavení. Nelze sice odhadnout zda střela míří do brány, ale v případě odrazu od okraje herní plochy nebo některé z bránících figur může dojít k přesunutí míče do oblasti brány, což je žádoucí efekt. Toto chování přinejmenším eliminuje situaci, kdy RSF opakovaně odráží míč od stěny. Takováto situace většinou skončí přebráním míče soupeřovou obranou.

## 5.4 Střela s přihrávkou

Byla realizována střela s přihrávkou podle algoritmu popsáném na 2.7 pro osu útočníků (video příloha 2). Daný algoritmus lze teoreticky použít i pro ostatní osy, avšak v případě osy zálohy by bylo velmi obtížné vybrat cíl střelby a osy obrany a brankáře nemohou riskovat pokusy o zastavení míče, protože potřebné naklonění os zapříčiní výrazné snížení pokryté plochy.

Ukázku střely s přihrávkou lze vidět na videopříloze `strela_s_prihravkou.mp4`.

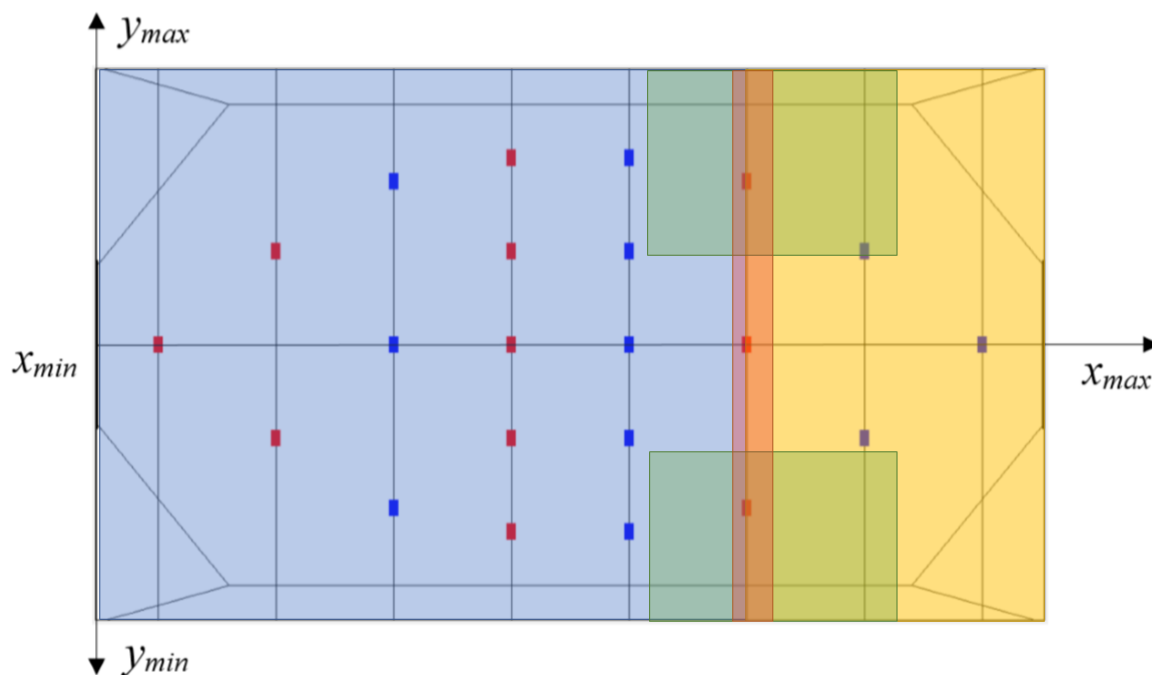
## 5.5 Strategie D

Strategie D je navržena na základě Strategie C, u níž byla zavedena zpětná vazba pro sledování polohy míče a upravena Pyramidová formace pro zvýšení efektivity. Hlavním cílem při návrhu a implementaci této strategie bylo zakomponovat Střelu pod úhlem a Střelu s přihrávkou a docílit tak zlepšení útočných vlastností RSF. Pro zlepšení útočných vlastností je nejpodstatnější osa útočníků. Strategie proto řídí osu útočníků nezávisle na zbylých osách, podobně jako osu brankáře. Řízení osy je realizováno v metodě `attack_line()`.

V rámci metody je chování určeno proměnnou `attack_mode`. Jestliže je hodnota této proměnné rovna `none`, znamená to, že osa nevykonává žádnou útočnou akci. Strategie rozhoduje o prováděné akci na základě pozice míče na hřišti a jeho rychlosti. Na nákresu 5.2 lze vidět jednotlivé oblasti, na které je hřiště z pohledu strategie útočné osy rozděleno. Výber následující akce probíhá následovně:

- Míč se nachází v zelených oblastech: Pokud jsou obě složky jeho rychlosti nižší než limitní hodnoty, RSF se pokusí míč zachytit.
- Míč se nachází ve žluté oblasti: Osa je natočena do svislé polohy a snaží se zabránit míči v opuštění této zóny.
- Míč se nachází v rudé oblasti: V závislosti na rychlosti míče a jeho  $y$  souřadnici může být míč buď odražen, odkopnut, odkopnut pod úhlem nebo přihrán a vystřelen na bránu.





Obr. 5.2: Rozdělení hřiště pro potřeby Strategie D

- Míč se nachází v modré zóně: Osa je natočena do vodorovné polohy a přesunuta do výchozí pozice.

Jestliže jsou splněny podmínky pro pokus o zachycení míče, nebo některou z akcí proveditelné v rudé oblasti, je hodnota *attack\_mode* změněna na odpovídající hodnotu a je změněna zpět na hodnotu *none* až po dokončení akce.

```
switch (attack_mode)
{
case pass_n_shoot:
    // Je prováděna střela s přihrávkou
case spray_shot:
    // Je prováděna střela pod úhlem
case shot:
    // Je prováděna běžná střela
case catch_ball_back:
    // Pokus o zachycení míče blížícího se zezadu
case catch_ball_front:
    // Pokus o zachycení míče blížícího se zepředu
case none:
    // Není zvolena
```

```

default:
    attack_mode == none;
}

```

V případě zachycení míče mimo oblast brány a zvolení akce střely s přihrávkou je potřeba nejprve určit cíl střely. K tomu slouží metoda *get\_target*, která analyzuje oblast brány a najde všechny mezery v obraně dost širové pro vstřelení gólu. Z nalezených mezer vybere tu nejširší a naplánuje střelu do jejího středu. Pokud je cíl nedosažitelný nebo nebyl nalezen, je místo původní akce zvolena střela pod úhlem.

Modulu řízení os jsou poté předány aktuální *y* souřadnice míče a cíle střely. Osa poté vykoná výše popsany postup.

Obranné taktiky strategie C byly kromě úpravy Pyramidové formace zachovány, neboť nebyly nalezeny žádné další nedostatky, které by bylo možno zlepšit bez výrazné ztráty obranných schopností RSF.

Úspěšnost implementace strategie D nelze řádně zhodnotit neboť je potřeba ji otestovat na reálném modelu proti lidskému protihráči nebo v simulaci proti jiné z vytvořených strategií.

## 6 Závěr

V rámci bakalářské práce proběhlo seznámení s řešením RSF firmy B&R a několika dalších firem a univerzit. Byly zhodnoceny některé nedostatky aktuálního stavu RSF a navrženy možné způsoby jejich řešení.

Konkrétně byly provedeny úpravy Modulu pro řízení os, potřebné pro testování na reálném modelu a realizaci střely s přihrávkou. Testování na reálném modelu nemohlo z technických a časových důvodů být uskutečněno. Bylo porovnáno původní řízení s omezením akčního zásahu os proti regulaci na polohu pomocí interního regulátoru v servopohonech ACOPOS. Ze srovnání vyšel lépe původní algoritmus, neboť při využití regulace na polohu docházelo v jistých situacích ke skokovému nárustu chyby, což však mohlo být způsobeno chybou v simulaci. Než však bude tato teorie prokázána nebo vyvrácena, využívá modul originální regulace.

Také byla navržena úprava parametrů servopohonů jako alternativní řešení problémů s otřesy konstrukce stolu při častých změnách požadované polohy, tato teorie však nemohla být ověřena.

Do modulu strategie byla přidána zpětná vazba, což vedlo ke snížení chyby při sledování  $y$  souřadnice míče a byla upravena Pyramidová formace tak, aby byla zvýšena její efektivita. Ačkoli zavedení zpětné vazby znatelně snížilo trvalou odchylku, nelze doporučit použití regulace v nynějším stavu, neboť výsledná požadovaná hodnota v jistých situacích silně vibruje, jak vidno z A.2.

Dále byla vybrána strategie C jako nejefektivnější z nyní funkčních strategií a byla na jejím základě vytvořena strategie D, která byla modifikována tak, aby došlo k navýšení ofenzivních schopností osy útočníků. Konkrétně byl proveden pokus o zapojení nově vytvořené Střely s přihrávkou a Střely z úhlu. Strategii je stále třeba řádně otestovat na reálném modelu.

# Literatura

- [1] JANSSEN, R.; Best, J.D.; MOLENGRAF, R.V.D.; STEIBUCH, M. *The Design of a SemiAutomated Football Table*. [PDF dokument]. Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, 2011 [cit. 29.04.2018]. Dostupné z URL: <<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/12113.pdf>>
- [2] WEIGEL, Thilo; NEBEL, Bernhard *KiRo – An autonomous table soccer player*. [PDF dokument]. Freiburg(Germany): Institut für Informatik Universität Freiburg , 2002 [cit. 29.04.2018]. Dostupné z URL: <<http://gki.informatik.uni-freiburg.de/papers/weigel-et-al-robocup-02-kiro.pdf>>
- [3] WEIGEL, Thilo *KiRo – A Table Soccer Robot Ready for the Market*. [PDF dokument]. Freiburg(Germany): Institut für Informatik Universität Freiburg , 2005 [cit. 29.04.2018]. Dostupné z URL: <[gki.informatik.uni-freiburg.de/papers/weigel-ki2005.pdf](http://gki.informatik.uni-freiburg.de/papers/weigel-ki2005.pdf)>
- [4] JANSSEN, R.; Best, J.D.; MOLENGRAF, R.V.D.; STEIBUCH, M. *The Design of a SemiAutomated Football Table*. [PDF dokument]. Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, 2011 [cit. 29.04.2018]. Dostupné z URL: <<https://www.faulhaber.com/en/markets/consumer/soccer-robots/>>
- [5] MYSLIVEC, V. *Robotický stolní fotbal*. [online]. Praha, 2015 [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61743>> Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Pavel Burget, Ph.D.
- [6] ALSALIHI, A.; NAJJR K.; SCOY, B.V.; ZIFER, J.; HARTELY; TRAN *Automated Foosball Table*. [PDF dokument]. Akron(Ohio): University of Akron, Department of Electrical and Computer engineering , 28.11.2011 [cit. 29.12.2018]. Dostupné z URL: <<https://www.uakron.edu/dotAsset/1e2fb3d4-8c59-475e-9473-ed98b2504f17.pdf>>
- [7] *Robotic Foosball*. Youtube [online]. 09.01.2008 [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.youtube.com/watch?v=KFAfwtsxarU>>. Kanál uživatele 930Porsche.
- [8] HOLLINGSHEAD, Todd. *BYU-created A.I.-powered foosball table goes head to head with humans*. In: BYU News [online]. Provo (Utah), 2016, 25.4.2016 [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://news.byu.edu/news/byu-created-ai-powered-foosball-table-goes-head-head-humans>>

- [9] KING, Lisa H. *AI machine beats college kids at foosball*. In: CNN [online]. Atlanta(Georgia), 1995, 28.04.2016 [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://money.cnn.com/2016/04/28/technology/ai-foosball/index.html>>
- [10] *Servo drive technology that amazes!*. In: PILZ the spirit of safety [online]. 2000, 11.04.2016 [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <https://www.pilz.com/en-INT/company/news/articles/088030>
- [11] *Discover our highlights at Motek 2017. Further information here!*. Youtube [online]. 11.04.2016 [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.youtube.com/watch?v=0jhggBhvPMU&feature=youtu.be>>. Kanál uživatele Pilz\_INT.
- [12] PESSINA, Laure-Anne. *All brawn, little brains: EPFL students' table-football robot*. In: L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne [online]. Lausanne(Switzerland), 2000, 11.08.2016 [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://actu.epfl.ch/news/all-brawn-little-brains-epfl-students-table-footba/>>
- [13] B&R, Automatio studio - *B&R Help Explorer 4.4.4.64*, 2018.
- [14] *Ethernet POWERLINK*. KUNBUS Industrial Communication [online]. Denkendorf(Německo) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.kunbus.com/ethernet-basics.html>>
- [15] *B&R Perfection in automation* [online]. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.br-automation.com/cs/>>
- [16] *HMI*. B&R Perfection in automation [online]. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.br-automation.com/cs/produkty/hmi/>>
- [17] *POWERLINK*. B&R Perfection in automation [online]. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.br-automation.com/cs/technologie/powerlink/>>
- [18] *mapp Technology*. B&R Perfection in automation [online]. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.br-automation.com/en/technologies/mapp-technology/>>
- [19] *Automation Studio*. B&R Perfection in automation [online]. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.br-automation.com/cs/produkty/software/automation-studio/>>

- [20] *Motion control*. B&R Perfection in automation [online]. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.br-automation.com/cs/produkty/motion-control/>>
- [21] *ACOPOStrack*. B&R Perfection in automation [online]. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.br-automation.com/en-gb/products/versatile-transport-systems/acopostrak/>>
- [22] *I/O Systems*. B&R Perfection in automation [online]. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.br-automation.com/cs/produkty/io-systems/>>
- [23] *Software* B&R Perfection in automation [online]. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.br-automation.com/en/products/software/>>
- [24] *Motion Control Concept and Configuratio* [online]. 21.09.2017. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.br-automation.com/downloads\\_br\\_productcatalogue/BRP44400000000000000513741/TM450TRE.433-ENG\\_ACOPOS%20Control%20Concept%20and%20Configuration\\_V5.0.pdf](https://www.br-automation.com/downloads_br_productcatalogue/BRP44400000000000000513741/TM450TRE.433-ENG_ACOPOS%20Control%20Concept%20and%20Configuration_V5.0.pdf)>
- [25] *Introduction to Motion Control* [online]. 16.11.2017. Eggelsberg(Rakousko) [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.br-automation.com/downloads\\_br\\_productcatalogue/BRP44400000000000000520222/TM400TRE.433-ENG\\_Introduction%20to%20Motion%20Control\\_V4330.pdf](https://www.br-automation.com/downloads_br_productcatalogue/BRP44400000000000000520222/TM400TRE.433-ENG_Introduction%20to%20Motion%20Control_V4330.pdf)>
- [26] HAND, Aaron. *ABB to Acquire Factory Automation Player B&R*. AutomationWorld [online]. 04.04.2017 [cit. 29.12.2018]. Dostupné z: <<https://www.automationworld.com/article/technologies/plcs-pacs/abb-acquire-factory-automation-player-b>>
- [27] VAVERKA, Pavel. *ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL - HERNÍ STRATEGIE* [online]. Brno, 2018 [cit. 31.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=108529](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=108529)>. Bakalářka práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Roman Parák.
- [28] SLÁMA, Ondřej. *ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL - ŘÍZENÍ HERNÍCH OS* [online]. Brno, 2018 [cit. 31.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=108530](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=108530)>. Bakalářka práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Roman Parák.

- [29] ŠVANDA, Ondřej. *ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL - SYSTÉMOVÁ INTEGRACE* [online]. Brno, 2018 [cit. 31.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=108531](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=108531)>. Bakalářka práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D.
- [30] SIJKOVÁ, Simona. *ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL - optimalizace snímání hrací plochy* [online]. Brno, 2018 [cit. 31.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=108532](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=108532)>. Bakalářka práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D.
- [31] OTRADOVSKÝ, Radek. *ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL - DETEKCE PROTIHRÁČE* [online]. Brno, 2017 [cit. 31.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=101048](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=101048)>. Bakalářka práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Roman Parák.
- [32] PARÁK, Roman. *ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL - HERNÍ STRATEGIE* [online]. Brno, 2017 [cit. 31.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=101047](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=101047)>. Bakalářka práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. et Ing. Stanislav Lang.
- [33] JEDINÝ, Lukáš. *ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL* [online]. Brno, 2016 [cit. 31.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=92322](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=92322)>. Bakalářka práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. et Ing. Stanislav Lang.
- [34] MAREČEK, Petr. *ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL* [online]. Brno, 2016 [cit. 31.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=92308](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=92308)>. Bakalářka práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. et Ing. Stanislav Lang.
- [35] *Téma: Detekce míčku pomocí Raspberry-Pi*. Konzultace s Alexandrem Kotorynskym, Autor detekce, Brno 31.10.2018, 2016 [cit. 04.01.2019].
- [36] BUBENÍK, Lubomír. *Model robotického stolního fotbalu* [online]. Brno, 2016 [cit. 31.12.2018]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=102078](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=102078)>. Bakalářka práce. VUT Brno. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.
- [37] *Foosball soccer* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <<https://www.foosballsoccer.com/>>

# Seznam symbolů, veličin a zkratek

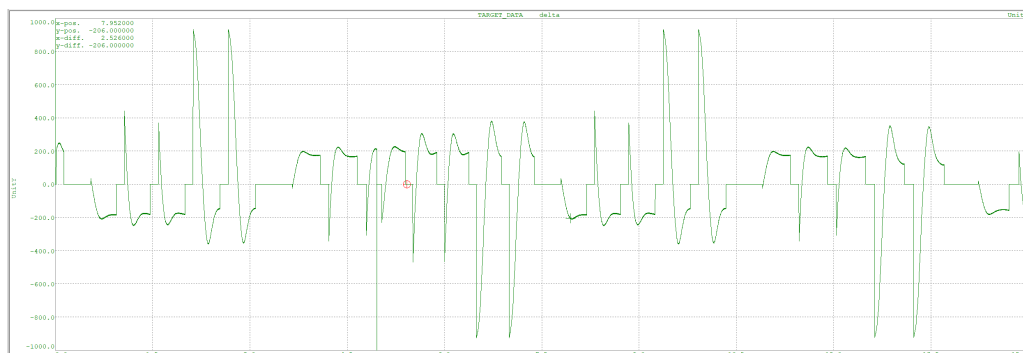
<b>RSF</b>	Robotický stolní fotbal
<b>IR</b>	Infračervené
<b>EPL</b>	Ethernet Powerlink
<b>MN</b>	Managing Node
<b>CN</b>	Controlled Node
<b>PReq</b>	Pull Request
<b>PRes</b>	Pull Response
<b>HW</b>	Hardware
<b>SW</b>	Software
<b>PLC</b>	Programable Logical Computer
<b>AS</b>	Automation Studio
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation - Pulzně Šířková modulace
<b>VNC</b>	Virtual Network Computing
<b>fps</b>	frames per second
<b>UDP</b>	User Defined Protocol
<b>PPC</b>	Power PC



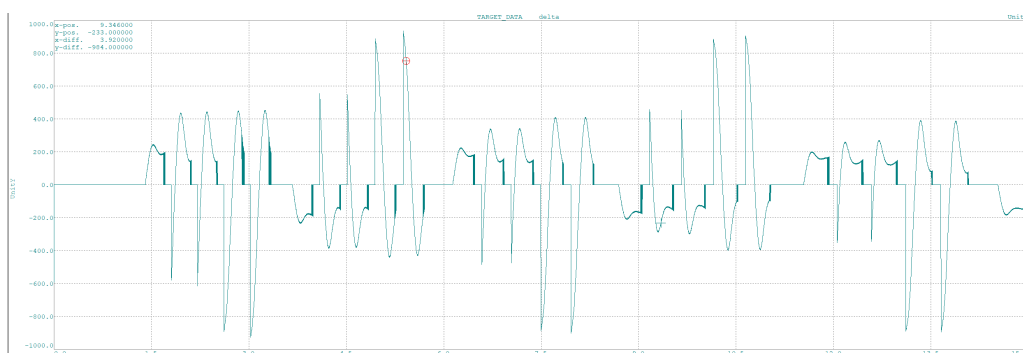
# Seznam příloh

A	Naměřené průběhy odchylky při sledování $y$ souřadnice míče	49
B	Obsah přiloženého CD	50

## A Naměřené průběhy odchylky při sledování $y$ souřadnice míče



Obr. A.1: Průběh odchylky při sledování  $y$  souřadnice míče, bez zpětné vazby



Obr. A.2: Průběh odchylky při sledování  $y$  souřadnice míče, zavedená zpětná vazba

## B Obsah přiloženého CD

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── videa.....složka s videi realizovaných úprav
│   ├── srovnani_regulace.mp4
│   └── strela_s_prihravkou_.mp4
├── RST.zip.....Projekt RSF v AS
├── src.....Zdrojové kódy vytvořené autorem práce
│   ├── Motion.....Úpravy modulu řízení os
│   └── Strategy.....Úpravy modulu strategie
├── xhlavi16.pdf.....dokument práce
└── prubehy_odchylky.....grafický průběh odchylky při sledování  $y$  souřadnice míče
    ├── bez_zv.png
    └── zavedena_zv.png
```